

تهیه و بررسی خواص شیمیایی و فیزیکی فیلم بیوکامپوزیتی خوراکی بر پایه نشاسته ساگو حاوی عصاره متانولی برگ کاکتوس، پکتین و نانوذرات اکسید روی

شریفه پورمحمدی^۱، پیمان ولی پور^۱، معصومه حسین زاده^{۱*}، رامین خواجهی^۲، محمد علی خلیل زاده^۳

^۱ گروه شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر، قائمشهر، ایران

^۲ گروه پلیمر و مهندسی شیمی دانشگاه آزاد تهران شمال، تهران، ایران

^۳ مرکز تحقیق و توسعه، شارلوتسویل، ایالات متحده آمریکا

اطلاعات مقاله

چکیده



واژه‌های کلیدی:

نشاسته ساگو، کاکتوس، پکتین،
زیست تخریب پذیر،
نانوذره اکسید روی

Keywords:

Sago starch, Cactus,
pectin, Biodegradable,
Zinc oxide nanoparticles.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

این مطالعه به بررسی تهیه فیلم‌های خوراکی زیست تخریب پذیر پرداخته است. علی‌رغم پیشرفت‌های فیلم‌های نشاسته ساگو، ترکیب همزمان عصاره متانولی برگ کاکتوس، پکتین و نانوذرات ZnO برای بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی بررسی نشده است. این مطالعه فیلم‌های بیوکامپوزیت خوراکی با روش solution casting تهیه و با نسبت‌های: پایه نشاسته ساگو (۴٪) را با افزودن عصاره با غلظت‌های (۰.۲۵٪، ۱.۰٪، ۵.۰٪)، پکتین (۰.۵٪) و ZnO (۰.۱٪) تهیه شد. هدف اصلی تحقیق، تغییرات ساختاری، فیزیکوشیمیایی فیلم‌ها با استفاده از تکنیک‌های GC-MS و SEM, XRD, ATR-FTIR (شناسایی ترکیبات فنولیک و اسیدهای چرب در عصاره) ارزیابی شدند، نتایج نشان داد که فیلم‌ها دارای تغییرات قابل توجهی در رطوبت (۱۱.۶۸±۰.۰۹۱-۱۲.۸۷±۰.۰۶۵) و حلالیت در آب (۵۶۹±۰.۳۲۵-۸۱.۶۲۵±۰.۲۶۵) نشان دادند و طیف FTIR برهم‌کنش‌های هیدروژنی میان ماتریس نشاسته-پکتین و ترکیبات زیست فعال را نشان می‌دهد. این فیلم‌های زیست تخریب پذیر با خواص بهبود یافته، جایگزین مناسبی برای بسته‌بندی فعال مواد غذایی فراهم می‌کنند.

مقدمه

ماندگاری محصولات ایفا می‌کند. با این حال، استفاده گسترده از بسته‌بندی‌های متکی بر پلیمرهای نفتی، به دلیل عدم تجزیه پذیری

بسته‌بندی مواد غذایی به عنوان یک جزء جدایی ناپذیر در زنجیره تأمین غذا، نقش حیاتی در حفظ کیفیت، ایمنی و افزایش

*E-mail: masoumehhosseinzadeh@iaui.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

رجاع: شریفه پورمحمدی، پیمان ولی پور، معصومه حسین زاده، رامین خواجهی، محمدعلی خلیل زاده، تهیه و بررسی خواص شیمیایی و فیزیکی فیلم بیوکامپوزیتی خوراکی بر پایه نشاسته ساگو حاوی عصاره متانولی برگ کاکتوس، پکتین و نانوذرات اکسید روی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۴۵: ۱ تا ۱۷ (۱۴۰۵).

مانند سدیم استارچ گلیکولات^۴ و همچنین افزودن مواد طبیعی دیگر باعث تقویت نشاسته می‌شود[۵].

پکتین به عنوان یک پلی ساکارید طبیعی و زیست تخریب پذیر که عمدتاً از دیواره سلولی میوه‌ها استخراج می‌شود، به دلیل خواص ژل‌کنندگی، فیلم‌سازی و توانایی ترکیب با دیگر پلیمرها، در تولید بیوفیلیم‌های خوراکی کاربرد گسترده‌ای دارد. پکتین علاوه بر بهبود خواص مکانیکی و انعطاف‌پذیری فیلم‌ها، به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی فعال، می‌تواند به عنوان حامل عوامل آنتی‌اکسیدان و ضد باکتریایی ایفا نقش کند که این امر موجب افزایش ماندگاری و ایمنی مواد غذایی می‌شود. پژوهش‌های اخیر ضمن تأکید بر نقش ترکیبات پکتینی در ایجاد فیلم‌های با عملکرد بالا، به اهمیت اصلاح ساختار پکتین برای بهبود پایداری و کارایی آن پرداخته‌اند [۶].

ترکیبات اسانس‌ها و عصاره‌های گیاهی به دلیل دارا بودن موادی نظیر فنول‌ها، فلاونوئیدها و آلکالوئیدها که ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی هستند نقش مهمی در توسعه فیلم بیوکامپوزیت خوراکی‌های ایفا می‌کنند. این ترکیبات طبیعی قادر به افزایش پایداری، بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی بیوفیلیم‌ها و همچنین افزایش مدت زمان ماندگاری و ایمنی مواد غذایی از طریق کنترل رشد میکروب‌های فسادزا هستند. کاربرد اسانس‌های گیاهی باعث شده تا بیوفیلیم‌ها علاوه بر عملکرد بسته‌بندی، نقش فعال حفظ کیفیت و سلامت غذایی را نیز ایفا کنند [۷].

نام علمی کلی کاکتوس‌ها متعلق به خانواده Cactacea است. یکی از گونه‌های مشهور و پرکاربرد به خصوص در مطالعات و کاربردهای دارویی و بیوفیلیم خوراکی می‌باشد. این گونه بومی مکزیک است اما در مناطق مختلف جهان از جمله مدیترانه، آفریقا و خاورمیانه کشت می‌شود و به خاطر خواص غذایی، درمانی و توانایی تحمل شرایط کم‌آبی معروف است این گیاه با توجه به دارا بودن مقادیر قابل توجهی از ترکیبات فنولی، پکتین و مواد آنتی‌اکسیدانی، به عنوان یک منبع طبیعی مناسب برای تهیه عصاره متانولی و استفاده در فیلم بیوکامپوزیت خوراکی‌ها مورد توجه قرار گرفته است. عصاره برگ کاکتوس دارای فعالیت‌های ضدباکتری و آنتی‌اکسیدانی موثر است که می‌تواند به عنوان یک عامل فعال در ساختار بیوفیلیم‌ها، خصوصیات آنتی‌باکتریال فیلم را بهبود بخشد و همچنین به حفظ تازگی مواد غذایی کمک کند. پژوهش‌های اخیر اثربخشی عصاره کاکتوس در افزایش مقاومت مکانیکی و فعالیت‌های زیستی فیلم بیوکامپوزیت خوراکی‌ها را نشان داده‌اند [۸].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی برای توسعه و بهینه‌سازی بیوفیلیم‌های خوراکی با استفاده از منابع طبیعی و زیستی پرداخته‌اند. این مطالعات عمدتاً بر بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و فعالیت‌های

و انباشت زباله‌ها، چالش‌های زیست‌محیطی جدی از جمله آلودگی خاک، آب و انتشار میکروپلاستیک‌ها را ایجاد کرده است [۱]. در پاسخ به این نگرانی‌ها، توسعه بیوفیلیم‌های بسته‌بندی به عنوان جایگزین‌های پایدار مورد توجه قرار گرفته است. بیوفیلیم‌های بسته‌بندی به لایه‌های نازک و پیوسته‌ای اطلاق می‌شود که از بیوپلیمرهای طبیعی ساخته شده و قابلیت محافظت از غذا در برابر عوامل فیزیکی، شیمیایی و میکروبی را دارند [۲].

به طور کلی، بیوفیلیم‌های بسته‌بندی بر اساس قابلیت مصرف به دو دسته اصلی خوراکی^۱ و غیرخوراکی^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. بیوفیلیم‌های خوراکی لایه‌هایی هستند که به عنوان بخشی از محصول غذایی در نظر گرفته شده و همراه با آن مصرف می‌شوند، بدون اینکه نیاز به حذف قبل از مصرف داشته باشند. این فیلم‌ها معمولاً از پروتئین‌ها، پلی ساکاریدها یا لیپیدها تهیه شده و علاوه بر عملکرد محافظتی، می‌توانند ارزش غذایی را نیز افزایش دهند. در مقابل، بیوفیلیم‌های غیرخوراکی (زیست تخریب پذیر) اگرچه از منابع طبیعی ساخته می‌شوند و در محیط زیست تجزیه می‌گردند، اما پیش از مصرف غذا باید از روی آن حذف شوند. پژوهش‌های اخیر تأکید ویژه‌ای بر توسعه بیوفیلیم‌های خوراکی داشته‌اند، زیرا این فیلم‌ها علاوه بر سازگاری زیست‌محیطی، با حذف مرحله جداسازی بسته‌بندی، ضایعات غذایی را کاهش داده و ایمنی مصرف را برای انسان تضمین می‌کنند [۳].

از دیگر خواص مهم بیوفیلیم‌های خوراکی می‌توان به قابلیت انطباق با مواد طبیعی از جمله نشاسته، پکتین، و عصاره‌های گیاهی اشاره کرد که این ترکیبات می‌توانند خواص فیزیکی و مکانیکی مناسبی ایجاد کرده و فعالیت‌های ضدباکتریایی را تقویت کنند. که این خواص اهمیت ویژه‌ای در کاهش ضایعات غذایی و حفظ سلامت مصرف‌کننده دارد [۴].

نشاسته ساگو که از نخل ساگو^۳ استخراج می‌شود، که در ایران از جنوب کشور تهیه می‌شود. منبع با ارزشی از کربوهیدرات‌های طبیعی است که به دلیل خصوصیات روان‌کنندگی، پف‌کنندگی و قابلیت تشکیل فیلم، در صنایع غذایی و بسته‌بندی کاربردهای گسترده‌ای یافته است. این ساگو خواص مشابهی با نشاسته‌های دیگر مانند سیب‌زمینی، نشاسته ذرت و تاپیوکا دارد و به دلیل فراوانی و قیمت مناسب، گزینه خوبی برای ساخت بیوفیلیم‌ها و مواد بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر محسوب می‌شود و همچنین نشاسته ساگو به دلیل دسترسی بالا، هزینه کم و قابلیت تشکیل فیلم عالی، ماده پایه مناسبی برای این کاربردهاست، اما محدودیت‌هایی مانند حلالیت بالا در آب و خواص مکانیکی ضعیف دارد و باید برای غلبه به این مشکلات آن را اصلاح و تبدیل این نشاسته به مشتقات فعال

(۱) edible
(۳) Metroxylon sago

(۲) Non-edible
(۴) Sodium Starch Glycolate

جدول ۱ - پیشینه تحقیق در سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۲۵

نتیجه گیری	مطالعات قبلی (۲۰۲۳-۲۰۲۵)
تایج حاکی از آن بود که افزودن عصاره سریش سبب بهبود نفوذ پذیری به بخار آب گردید اما تاثیر معنی داری بر ضخامت، حلالیت در آب و جذب آب نشان نداد	تولید فیلم خوراکی بر پایه نشاسته ساگو حاوی عصاره گیاه سریش (۱۴۰۳) [۱۴]
Low doses; balanced mechanics (+EAB, stable TS); non-refrigerated produce	SagoStarch/phycoyanin/ZnONPs. [۲۲]
inhibition zones vs. control	Sago starch/ Peganum harmala extract + TiO ₂ crosslinking [۱۵]
Sago-specific; practical efficacy under uncontrolled RH/temp	Gelatin+ NC [۱۶]

این یافته‌ها اهمیت استفاده از نانوذرات روی در ماتریس‌های نشاسته‌ای را تأیید می‌کند [۱۱]. یانگ^۶ و همکاران (۲۰۲۳) فیلم‌های کاراگینان را با نشاسته، نانوسولز و آلوه‌ورا تقویت کردند که خواص مکانیکی، حرارتی و ضدباکتری بهبود یافت [۱۲].

راحتل شارما^۷ و همکاران به بررسی توسعه سیستم بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر حاوی نانوذرات اکسید رویدر غلظت‌های مختلف در نشاسته می‌پردازد. نانوذرات روی با تقویت ساختار، استحکام کششی و دوام بیوفیلم‌های نشاسته، خواص مکانیکی آنها را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، آنها به عنوان پرکننده‌های مقاوم در برابر حرارت عمل می‌کنند و استقامت حرارتی فیلم‌ها را افزایش می‌دهند. این فیلم‌ها پس از تیمار با نانوذرات روی، ویژگی‌های مکانیکی، ضدباکتریایی و مانع اشعه فرابنفش بهبود یافته‌ای را نشان دادند و همچنین در جدول ۱ پژوهش‌های دیگر ارائه شده است [۱۳].

هدف این پژوهش، تهیه و ارزیابی فیلم‌های بیوکامپوزیتی خوراکی بر پایه نشاسته ساگو (۴٪) با استفاده از غلظت‌های مختلف عصاره متانولی برگ کاکتوس (۰،۲۵-۱،۰٪)، پکتین (۰،۵ گرم) استخراج‌شده از پوست گریپ فروت و نانوذرات اکسید روی (۰،۱٪) از طریق روش ریخته‌گری^۸ است. نوآوری پژوهش در بررسی همزمان اثرات این سه افزودنی بر ساختار و خواص فیزیکوشیمیایی (رطوبت و حلالیت)، ساختاری (طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه^۹، پراش سنجی پرتو ایکس^{۱۰}، میکروسکوپ الکترونی رویی^{۱۱} طیف‌سنجی پراش انرژی^{۱۲}) و ترکیبات زیست فعال عصاره (GC-MASS) بررسی می‌شود. نتایج این کار پتانسیل فیلم‌ها را برای بسته‌بندی فعال مواد غذایی نشان خواهد داد.

بخش تجربی

در این مطالعه از نشاسته ساگو از بازار محلی تهیه و بدون هیچ پیش تیماری استفاده شد. پوست گریپ فروت برای استخراج پکتین،

ضدباکتریایی بیوفیلم‌ها متمرکز بوده‌اند تا بتوانند جایگزینی کارآمد و زیست‌سازگار برای بسته‌بندی‌های پلاستیکی ارائه دهند. برای نمونه، پژوهش‌های زیادی روی استفاده از عصاره‌های گیاهی در تهیه بیوفیلم‌های خوراکی انجام شده است که تمرکز عمده بر خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدباکتریایی و بهبود خواص مکانیکی فیلم‌ها بوده است در مطالعه‌ای اخیر، استفاده از عصاره‌های گیاهی مانند عصاره چای سبز در پوشش‌های نانوکیتوزان باعث بهبود خواص فیزیکوشیمیایی و میکروبی بیوفیلم‌ها شده است [۹]. کاربرد عصاره زنجبیل نیز در بهبود شاخص‌های رشد و خواص زیستی بیوفیلم‌ها به اثبات رسیده که توانسته است فعالیت‌های ضدباکتریایی و خواص آنتی‌اکسیدانی آنها را افزایش دهد [۱۰].

نانوذرات اکسید روی^۱ به دلیل خواص چندمنظوره‌ی خود از جمله فعالیت ضد میکروبی گسترده، پایداری حرارتی بالا، شفافیت نوری مناسب و توانایی بهبود خواص مکانیکی و سدی، به عنوان یکی از مؤثرترین نانوافزودنی‌ها در توسعه فیلم‌های بسته‌بندی فعال مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نانوذرات، هنگامی در ماتریس‌های پلیمری زیست تخریب‌پذیر (مانند نشاسته یا پکتین) پراکنده شوند، نه تنها با ایجاد برهم‌کنش‌های هیدروژنی با گروه‌های عاملی زنجیره‌های پلیمری، ساختار فیزیکی فیلم را تقویت می‌کنند، بلکه با کاهش نفوذپذیری بخار آب و اکسیژن، ویژگی‌های سدی فیلم را نیز بهبود می‌بخشند. همچنین، ZnO NPs فعالیت ضدباکتریایی قوی‌ای علیه پاتوژن‌های غذایی رایج مانند اشریشیا کُلی^۲ و استافیلوکوکوس اورئوس^۳ از خود نشان داده‌اند که آنها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربرد در بسته‌بندی فعال تبدیل می‌کند.

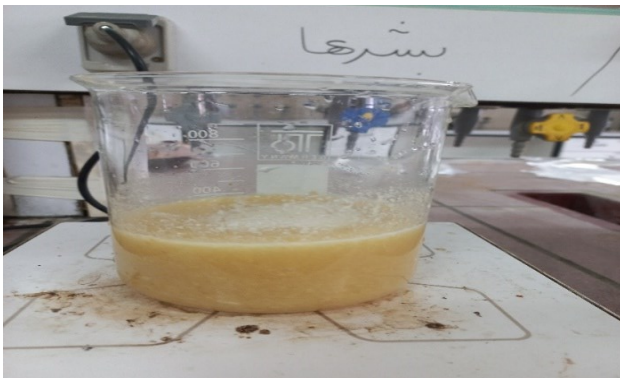
سیاریفا^۴ و همکاران (۲۰۲۳) خواص ریخت‌شناسی، حرارتی، مکانیکی و مانع بخار آب فیلم‌های نشاسته حاوی میکرو و نانو اکسید روی را بررسی کردند و نشان دادند که نانوذرات روی نسبت به میکرو پلاستیک‌ها^۵ عملکرد بهتری در بهبود استحکام مکانیکی و خاصیت مانع دارند.

(۱) ZnO NPs
(۳) Staphylococcus aureus
(۵) microparticles
(۷) Rahul Sharma
(۹) FTIR
(۱۱) SEM

(۲) Escherichia coli
(۴) Syarifa
(۶) Yang
(۸) solution casting
(۱۰) XRD
(۱۲) EDS



شکل ۱ - تصویر برگ گیاه کاکتوس



شکل ۲ - تصویر پکتین جمع آوری شده

تهیه نانو ذرات اکسید روی از عصاره کاکتوس

۵۰ میلی لیتر روی نیترات ۶ آبه (۰٫۵ مولار) را تهیه می‌کنیم به مدت ۴۰ دقیقه بر روی استریل حرارت می‌دهیم و بعد به آن ۳ میلی لیتر عصاره کاکتوس در حال همزدن اضافه می‌کنیم و PH مخلوط بدست آمده توسط محلول NaOH (مولار ۰٫۰۱)، به آرامی و قطره قطره به ۱۰ رسانده شد سپس مخلوط واکنش یک ساعت در دمای °C ۶۰-۵۰ همزده می‌شود. در ادامه به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق همزده شد. رسوب حاصل توسط سانتریفیوژ (۸۰۰ دور در دقیقه) جداسازی شد. محلول زیرین که حاوی رسوب روی اکسید می‌باشد سه بار با مخلوط ۱:۱ اتانول و آب شستشو داده می‌شود و بعد رسوب جمع‌آوری گردید، در آن خشک و در کوره به مدت ۳ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس کلسینه شد، که نتیجه آن نانوذرات روی اکسید خالص بود. نانوذرات روی اکسید بدست آمده از طریق تکنیک SEM, EDX, XRD و FT-IR شناسایی گردید [۱۹].

روش تهیه فیلم بیوکامپوزیت خوراکی

تهیه فیلم بیوکامپوزیت خوراکی نشاسته ساگو

فیلم‌های نشاسته ساگو با روش ریخته‌گری محلول تهیه می‌شود. ۴ گرم نشاسته ساگو نیز در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر حل شد و رسوب حاصل با هم زدن مداوم در فاصله زمانی ۴۵ دقیقه تا ۹۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد و به آن به مقدار ۰٫۵ گرم پودر پکتین اضافه می‌کنیم

و برگ‌های کاکتوس برای عصاره‌گیری در آزمایشگاه تهیه گردید. نانوذرات اکسید روی سنتز شده و تمام مواد شیمیایی از جمله HCL، NaOH و اتانول از شرکت سیگما-آلدریج تهیه شد. دو باکتری *Staphylococcus aureus* (PTCC 1769) *Escherichia coli* (PTCC 1431) مرکز کشت‌های باکتری تهران، ایران تهیه شدند و دستگاه‌های مورد استفاده از جمله: دستگاه FT-IR با دستگاه Shimadzu IR-Prestige 21 (ژاپن) در محدوده $4000-400\text{ cm}^{-1}$ با رزولوشن 4 cm^{-1} انجام شد. دستگاه XRD: بادیستگاه Bruker D8 Advance (آلمان) با استفاده از پرتو $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406\text{ \AA}$) در محدوده $\theta = 20-80^\circ$ و سرعت اسکن ۲/دقیقه. دستگاه SEM و EDS با دستگاه (Tescan MIRA3 جمهوری چک) در ولتاژ ۱۵ kV و همراه EDS برای تحلیل عنصری و دستگاه GC-MASS: (Agilent 7890B/5977B آمریکا) و ترکیبات عصاره کاکتوس با دستگاه (Agilent 7890B/5977B آمریکا) مجهز به ستون HP-(5MS (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm) آنالیز شد. دمای انجکتور °C ۲۵۰ و سرعت اسکن ۲-۵۰ amu ثانیه‌ای بود.

عصاره‌گیری از برگ کاکتوس به روش خوابانیدن

ابتدا ۱۰۰ گرم از برگ‌های تازه کاکتوس وزن شده و تیغ‌های برگ کاکتوس گرفته شد و به تیکه‌های کوچک بریده شد و در آن در دمای ۴۰ درجه خشک شده است و بعد از خشک شدن وزن ۸۲٫۸ گرم و در ۱۰۰ میلی لیتر متانول به مدت ۷۲ ساعت در جای تاریک قرار میدیم نسبت گیاه/متانول (۱:۷/۱) و بعد صاف می‌کنیم و حلال پراکنی کرده جرم عصاره ۱۸٫۵ گرم گزارش شده بازده عصاره ۲۲٫۳۴٪ درصد می‌باشد و عصاره را در یخچال نگه داری می‌شود [۱۷].

استخراج پکتین از پوست گریفروت

پوست گریفروت به نوارهای باریک‌تر بریده شدند و پوست سفید با چاقو جدا شد در دمای °C ۴۰ خشک شد و برای استخراج پکتین استفاده شد. ۲۵۰ گرم پودر پوست گریفروت در ۵۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه ریخته و با اسید کلریدریک غلیظ (0.05M) HCL مخلوط شد تا پی اچ محلول به ۲ تنظیم شد سپس به مدت ۱-۲ ساعت به آرامی در هر ظرف پخته شد. پس از این، پودر پوست‌ها با استفاده از پارچه صافی از عصاره‌ها جدا شد سپس با NaOH (0.1M) خنثی‌سازی می‌کنند. پکتین استخراج شده با اضافه کردن نسبت مساوی اتانول به پکتین استخراج شده با هم زدن کامل، رسوب داده شد و به مدت ۳۰ دقیقه به حال خود رها شد تا پکتین روی سطح شناور شود. ژل پکتین با سانتریفیوژ از اتانول و آب جدا شد. پکتین استخراج شده با شستشو در ۲۰۰ میلی لیتر استون خالص سازی شد و سپس روی یک پارچه نایلونی فشار داده شد تا HCL و نمک عمومی باقی مانده حذف شود. پکتین حاصل وزن شده و به قطعات کوچک خرد شده و در هوا خشک شد [۱۸].

جدول ۲ - مقادیر ترکیبات شیمیایی در فیلم بیوکامپوزیت خوراکی

نام فیلم ها	ساگو (گرم)	نانو ذرات اکسید روی (گرم)	عصاره متانولی کاکتوس (گرم)	پکتین (گرم)	گلیسرول/سوربیتول
CA0	۴	-	-	-	۱ : ۳
CA1	۴	-	۰/۲۵	۰/۵	۱ : ۳
CA2	۴	-	۰/۵۰	۰/۵	۱ : ۳
CA3	۴	-	۰/۷۵	۰/۵	۱ : ۳
CA4	۴	-	۰/۱۰	۰/۵	۱ : ۳
CAZnONPs	۴	۰/۱	۰/۱۰	۰/۵	۱ : ۳



شکل ۳ - مراحل تهیه بیو فیلم

و جذب یکنواخت نانو ذره رخ دهد. پس از آن محلول تا حدود ۴۵ درجه سلسیوس خنک شد و عصاره متانولی کاکتوس با غلظت ثابت ۱،۰٪ (w/v) اضافه شد. سپس دیسپرس کننده حاصل به مدت ۱ ساعت به طور مداوم هم زده شد تا مخلوط کاملی از اجزای فعال به دست آید. این مخلوط نهایی بعداً به ظروف پتری با قطر ۱۴۰ میلی متر منتقل شد و سپس به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس خشک شد. پس از خشک شدن، لایه ها استخراج شده و قبل از شروع مرحله توصیف، در دمای ۲۳ درجه سلسیوس قرار داده شدند [۲۲].

آزمون ضخامت و رطوبت فیلمها

ضخامت فیلم ها بار ۵ تکرار به طور تصادفی از مرکز فیلمها گرفته شده و با میکرو دیجیتال اندازه گیری شده است. میزان رطوبت فیلمها طبق روش [۲۳] تعیین شد. فیلمها به قطعات کوچک (۲ × ۲ سانتی متر) بریده شدند، روی پتری دیشهای شیشه ای قرار داده شدند و جرم آنها (M1) اندازه گیری شد. وزن فیلم با وزن کردن نمونه ها در فر با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت تا رسیدن به وزن ثابت (M2) تعیین شد. نمونه ها با دقت ۰،۰۰۱ گرم وزن شده و سه تکرار از هر تیمار فیلم قبل و بعد از فر ثبت شد تا میزان رطوبت محاسبه شود.

$$\text{Moisture content (\%)} = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100 \quad (1)$$

که در آن M1 و M2 وزن اولیه فیلم و وزن فیلم پس از خشک شدن هستند.

و تا ژلاتینه شدن کامل نشاسته حاصل شد. مخلوطی از سوربیتول و گلیسرول را با نسبت (۳:۱) مخلوط کرده و به میزان ۴۰ درصد (W/W) در مقایسه با محتوای نشاسته به منظور ایجاد انعطاف پذیری به فیلم اضافه کردند. پس از آن، محلول تا دمای ۴۰-۴۵ درجه سلسیوس سرد شد. متعاقباً، عصاره متانولی کاکتوس در مقادیر مختلف، یعنی ۰،۲۵، ۰،۵، ۰،۷۵ و ۱،۰ درصد وزنی، مطابق جدول ۲ تهیه شد. قطعات هر فرمولاسیون به ظروف پتری (قطر ۱۴۰ میلی متر) منتقل و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس در فر خشک شدند. سپس فیلمها پس از فرآیند خشک شدن با دقت از روی سطح جدا شدند و پس از آن برای انجام تجزیه و تحلیل بیشتر در دسیکاتور نگهداری می شود. برای بررسی تکرارپذیری [۲۰-۲۱].

تهیه فیلم بیوکامپوزیت خوراکی نشاسته ساگو با نانو ذره روی

فرمولاسیون فیلم نشاسته با افزودن عصاره متانولی کاکتوس (CA) و نانو ذرات اکسید روی بود. معادل ۰،۱ گرم در ۱۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه حل شد و کل مخلوط به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق به صورت مغناطیسی هم زده شد. سپس مخلوطی از ۴ گرم نشاسته و ۰،۵ گرم پکتین و یک نرم کننده متشکل از گلیسرول و سوربیتول به نسبت ۱:۳ مخلوط شد، به طوری که نرم کننده متشکل از گلیسرول و سوربیتول ۴۰٪ (w/w) از محتوای نشاسته را تشکیل می دهد تا در نهایت محلول نشاسته ساگو با ۴٪ (w/v) به دست آید. مخلوط تا دمای ۹۰ درجه سلسیوس جوشانده شد و به مدت ۴۵ دقیقه هم زده شد تا حداکثر ژلاتینه شدن

آزمون حلالیت

حلالیت فیلم در آب طبق روش‌های گزارش شده توسط [۲۴] با تغییرات جزئی تعیین شد. قطعات کوچک (۲ سانتی‌متر × ۲ سانتی‌متر) از هر فیلم بریده شده و به مدت ۲۴ ساعت در فر با دمای ۷۰ درجه سلسیوس (تا رسیدن به وزن ثابت) خشک شدند تا وزن خشک اولیه (M1) تعیین شود. سپس فیلم‌های خشک در ۵۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس تحت هم زدن مداوم قرار گرفتند. پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری، نمونه‌ها بلافاصله پس از خشک شدن سطحی با کاغذ صافی (واتمن شماره ۱) برای حذف آب اضافی اندازه‌گیری شد. نمونه‌های فیلم دوباره در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت (تا رسیدن به وزن ثابت) در آون خشک شدند تا وزن خشک نهایی (M3) تعیین شود. از هر نمونه فیلم سه تکرار گرفته شد و وزن‌ها با دقت ۰,۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شدند. درصد تورم و حلالیت فیلم با استفاده از معادلات زیر محاسبه شد:

$$\text{Solubility (\%)} = \frac{M1 - M3}{M1} \times 100 \quad (2)$$

ارزیابی فعالیت ضد میکروبی

فعالیت ضد میکروبی فیلم‌های بیوکامپوزیت بر پایه نشاسته ساگو با عصاره کاکتوس و نانوذرات روی با استفاده از روش دیسک دیفیوژن^۱ و تعیین حداقل غلظت مهاری^۲ ارزیابی شد. سویه‌های استاندارد باکتریایی استافیلوکوکوس اورئوس (PTCC11431) و اشریشیا کلی (PTCC1769) از بانک میکروبی تهیه و در محیط مولر-هینسون بروث (MHB) کشت داده شدند. دیسک‌های حاوی فیلم (قطر ۶ میلی‌متر) استریل شده روی آگار مولر-هینسون قرار گرفته و پس از انکوباسیون ۲۴ ساعته در ۳۷ درجه سلسیوس، قطر هاله عدم رشد^۳ اندازه‌گیری گردید؛ MIC نیز با روش میکرودیوژن بروث دو برابر رقیق‌سازی تعیین شد.

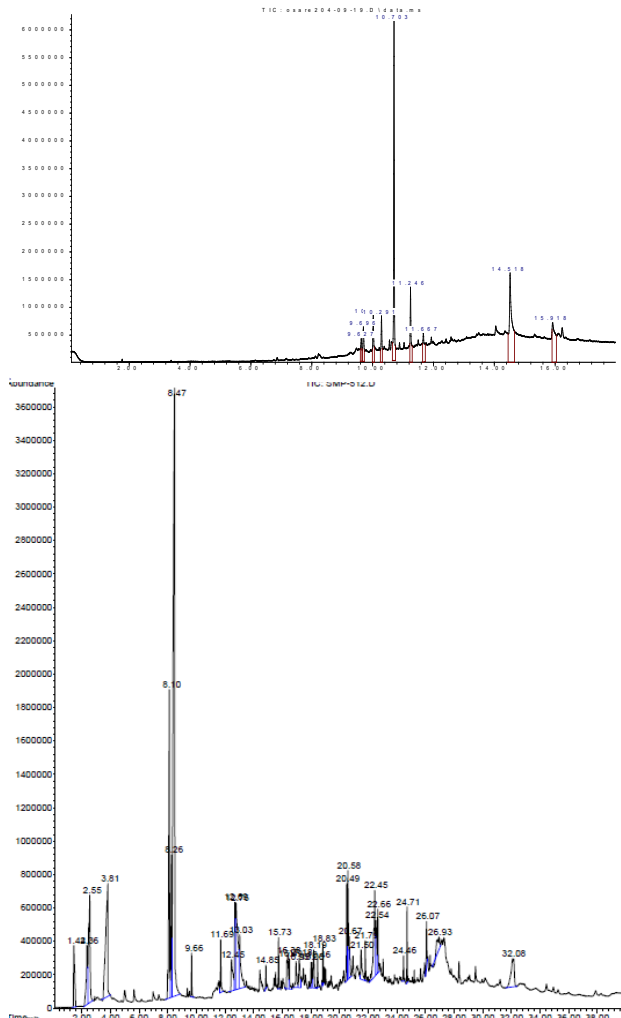
تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های تجربی به صورت میانگین ± انحراف معیار ارائه شدند. برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS 25.0 استفاده شد و تفاوت‌های معنی‌دار بین نمونه‌ها با استفاده از آنالیز واریانس یک‌طرفه و آزمون چند دامنه‌ای دانکن ($p < 0.05$) ارزیابی شد. تمام شکل‌ها با نرم‌افزار (ORIGINPRO 2022 Inc.)، مینیپولیس، ایالات متحده آمریکا) تولید شدند.

بررسی نتایج

بررسی نتایج حاصل از GC-MASS عصاره متانولی کاکتوس

نتایج تجزیه GC-MASS عصاره متانولی برگ کاکتوس در شکل ۴ نشان داد که این عصاره حاوی گروه‌های مختلفی از



شکل ۴ - طیف‌های GC-MASS متانولی عصاره کاکتوس

ترکیبات شامل چرب، مشتقات فنولی و است. در جدول ۳ ترکیب ۴،۴-(p-Phenylenediisopropylidene)diphenol) بیشترین درصد را دارد و در جدول دوم ۱،۳-Butanediol می‌باشد. حضور این ترکیبات بیانگر آن است که عصاره برگ کاکتوس می‌تواند به عنوان منبع مناسبی از ترکیبات زیست فعال با پتانسیل ضدباکتریایی در فرمولاسیون فیلم‌های زیست تخریب‌پذیر مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی نتایج حاصل نانو ذره روی

افزایش عصاره متانولی عصاره کاکتوس به محلول روی نیترا به تدریج باعث تغییر رنگ محلول از زرد به قهوه‌ای شد.

نتایج حاصل از طیف FT-IR نانوذرات روی اکسید

مقایسه طیف‌ها حضور لایه نازکی از ترکیبات شیمیایی گیاه را روی نانوذرات ثابت می‌کند. در طیف FT-IR نانو ذره روی حاصل از

(۱) Disk Diffusion
(۳) Zone of Inhibition

(۲) MIC

جدول ۳ - درصد ترکیبات شیمیایی GC-MASS عصاره متانولی کاکتوس در دو ستون

جرم مولکولی	فرمول مولکولی	سطح پیک (%)	ترکیبات	زمان بازداری (دقیقه)	تعداد
۵۶۶/۶۰	$C_{38}H_{78}O_2$	۲/۵۰	1,1'-[(1-methyl-1,2-ethanediyl)bis (OXY)]bis	۹/۶۲	۱
۳۵۱/۳۸	$C_{16}H_{22}FN_5O_3$	۳/۸۰	4-Fluoro-2-nitroaniline,5-[4-(pyrrolidin-1-yl)carbonylmethylpiperazin-1-yl]	۹/۶۹	۲
۳۵۱/۳۸	$C_{16}H_{22}FN_5O_3$	۵/۳۳	Fluoro-2-nitroaniline,5-[4-(pyrrolidin-1-yl)carbonylmethylpiperazin-1-yl]	۱۰/۰۲	۳
۳۵۱/۳۸	$C_{16}H_{22}FN_5O_3$	۵/۰	Fluoro-2-nitroaniline,5-[4-(pyrrolidin-1-yl)carbonylmethylpiperazin-1-yl]	۱۰/۲۹	۴
۳۴۶/۴۶	$C_{24}H_{26}O_2$	۲۹/۳۴	4,4'-(p-Phenylene)diisopropylidene)diphenol	۱۰/۷۳	۵
۴۰۶/۵	$C_{24}H_{30}O_9$	۷/۶۷	5H-Cyclopropa[3,4]benz[1,2-e]azulen-5-one,9, 9a-(acetyloxy)-1,1a,1b,4a,7a,7b,8,9,9a-decahydro-2	۱۱/۲	۶
۴۱۶/۶۵	$C_{27}H_{44}O_3$	۵/۳۱	6-((E)-4-((Z)-2-(5-hydroxy-2-methylenecyclohexylidene)ethylidene)-7a-methyloctahydro-1H-inden-1-yl)-2-methylheptane-2,3-diol	۱۱/۶	۷
۳۹۰/۶	$C_{24}H_{38}O_4$	۲۷/۹۲	Diisooctyl phthalate	۱۴	۸
۴۳۶/۵	$C_{24}H_{33}FO_6$	۱۳/۰۸	Flurandrenolide	۱۶	۹

جرم مولکولی	فرمول مولکولی	سطح پیک (%)	ترکیبات	زمان بازداری (دقیقه)	تعداد
۷۳/۰۹	C_3H_7NO	۲/۴۴	Propanamide	۲/۳۵	۱
۶۰/۱	C_3H_8O	۴/۹۹	2-Propanol	۲/۵۵	۲
۶۰/۰۵	$C_2H_4O_2$	۷/۳۸	Acetic acid	۳/۸۰	۳
۹۰/۱۲	$C_4H_{10}O_2$	۳۷/۸۴	1,3-Butanediol	۸/۱۰	۴
۹۰/۱۲	$C_4H_{10}O_2$	۳/۰۵	2,3-Butanediol	۸/۲۶	۵
۸۴/۰۷	$C_4H_4O_2$	۵/۷۶	2(5H)-Furanone	۱۲/۷۶	۶
۲۱۰/۷۰	$C_{12}H_{15}ClO$	۱/۴۸	4-chloro-4-methyl-2-phenylpentan	۱۶/۳۸	۷
۱۷/۳۳	$C_{12}H_{26}$	۰/۱	Dodecane	۱۶/۴۹	۸
۲۱۰/۲۳	$C_{11}H_{14}O_4$	۰/۹۰	N,N-DIISOPROPYL-PROPIONIC ACID	۱۶/۹۵	۹
۳۴/۱۲	H_4Si	۱/۱۱	Silane	۱۷/۱۸	۱۰
۴۴۴/۹۲	$C_{12}H_{31}O_5Si_6$	۱/۰۹	Cyclohexasiloxane	۱۸/۱۹	۱۱
۱۵۰/۱۷	$C_9H_{10}O_2$	۰/۴۷	4-vinyl-2-methoxy-phenol	۱۸/۴۶	۱۲
۵۷۷/۲	$C_{18}H_{52}O_7Si_7$	۲/۶۶	3-Isopropoxy-1,1,1,7,7,7-hexamet	۲۰/۵۸	۱۳
۲۸۱/۳۳	$C_{13}H_{15}NO_4S$	۱/۲۰	Tetracyclo[4.3.2.0(2,9).0(3,5)]	۲۰/۶۷	۱۴
۱۳۶/۱۴	$C_8H_8O_2$	۱/۱۹	Benzeneacetic acid	۲۱/۵۰	۱۵
۳۹۰/۶	$C_{24}H_{38}O_4$	۱/۷۶	Di-(2-ethylhexyl)phthalate	۲۲/۵۴	۱۶
۱۷۸/۳۵	$C_{11}H_{18}Si$	۱/۳۱	trimethylsilyl [2,3-di(trimethyl...	۲۲/۶۷	۱۷
۲۳۶/۴	$C_{18}H_{20}$	۱/۰	(2,4-Diphenyl-4-methyl-1(E)-	۲۴/۷۶	۱۸
۲۵۶/۴۲	$C_{16}H_{32}O_2$	۰/۸۸	Hexadecanoic acid	۲۶/۰۷	۱۹
۴۱۶/۴۸	$C_{28}H_{48}O_2$	۱/۷۴	gamma.-Tocopherol	۲۶/۹۳	۲۰
۳۸۰/۷	$C_{27}H_{56}$	۲/۸۶	Heptacosane	۳۲/۰۸	۲۱

مشاهده پیک در این محدوده ($400-600\text{ cm}^{-1}$) حضور موفق ZnO را نشان می‌دهد [۲۶-۲۵]. پیک 1120 cm^{-1} معمولاً مربوط به ارتعاشات C-O یا گروه‌های بنزیدار یا آلکسی است که حاصل ترکیبات آلی باقی‌مانده از مواد کاهنده یا پایدارکننده می‌باشد.

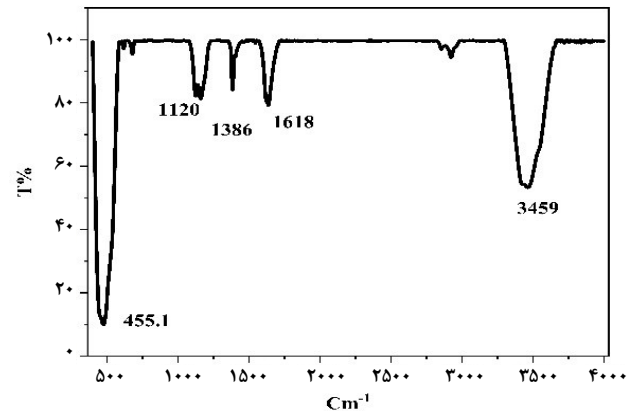
بیوستر توسط عصاره متانولی شکل ۵ حضور چندین گروه عملکردی و پیوند شیمیایی مشخص است که خصوصیات ساختاری نانوذرات را تأیید می‌کند. پیک $455,1\text{ cm}^{-1}$ این ناحیه معرف نوسان کششی پیوند Zn-O در ساختار ZnO بوده و بارزترین ویژگی نانوذرات روی است.

۲۳ نانومتر می‌باشد و شدت بالای پیک‌ها نشان‌دهنده بلورینگی بالای نانوذرات است. عدم وجود پیک‌های اضافی بیانگر خلوص بالای نمونه و عدم حضور فازهای آلوده یا غیر بلوری است. این نوع طیف معمولاً نشان‌دهنده موفقیت در سنتز نانوذرات روی با ساختار بلوری مطلوب است. و کد گزارش شده است JCPDS 01-079-0205.

DLS روش فوتونی است که اندازه‌ی ذرات را در حالت پراکنده در محلول (معمولاً آب یا حلال‌های قطبی) بر اساس نوسانات پراکندگی نور اندازه‌گیری می‌کند. این روش به‌ویژه برای تخمین اندازه هیدرودینامیکی^۲ ذرات نانومتری مناسب است. توزیع اندازه‌ی نانوذرات اکسید روی در محیط آبی با استفاده از روش پراکندگی پویای نور^۳ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوذرات دارای میانگین اندازه‌ی هیدرودینامیکی حدود ۲۳ نانومتر هستند و توزیع اندازه‌ی آن‌ها باریک و یکنواخت است. این یافته هم‌خوانی خوبی با اندازه‌ی بلوری محاسبه‌شده از روش ویلیامسون-هال بر اساس داده‌های XRD (حدود ۲۳ نانومتر) و همچنین تصاویر SEM دارد که ذرات را به‌صورت جداگانه، تقریباً کروی و بدون آگلومره‌شدن نشان می‌دهد. توزیع باریک اندازه و عدم وجود پیک‌های ثانویه در نمودار DLS، گویای پایداری کلئیدی مناسب نانوذرات در محیط آبی و عدم تمایل به تشکیل آگلومره است که امری حیاتی در توزیع یکنواخت نانوذرات در ماتریس فیلم زیستی محسوب می‌شود. این ویژگی‌ها به‌طور مستقیم بر بهبود خواص ضدباکتریایی، مکانیکی و نوری فیلم نانوکامپوزیتی تأثیر مثبت می‌گذارد.

بررسی نتایج حاصل از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

شکل ۷ تصویر SEM نانو ذرات اکسید روی معمولاً ریخت‌شناسی سطحی، توزیع اندازه و شکل ذرات را نشان می‌دهد که اطلاعات کلیدی درباره فرآیند سنتز و خصوصیات ساختاری ماده به دست می‌دهد. شکل و ریخت‌شناسی: تصاویر SEM نانوذرات روی غالباً تجمع‌های کروی، شبه‌کروی، یا گاهی هگز^۴ را نشان می‌دهند. اندازه ذرات معمولاً در محدوده ۲۳ نانومتر است و اغلب توزیع یکنواخت دارند. اندازه دانه‌ها: اندازه متوسط ذرات اکسید روی در پژوهش‌های اخیر، بسته به روش سنتز، بین ۲۲ تا ۷۵ نانومتر گزارش شده است. مثلاً، در روش‌های هیدروترمال و سنتز سبز، ذرات با اندازه‌های ۲۲، ۴۵، یا حتی ۷۵ نانومتر مشاهده شده‌اند که با روش‌های XRD تطابق دارد. تراکم و تجمع ذرات: مشاهدات SEM نشان‌دهنده تجمع نسبی در برخی نقاط و توزیع مناسب ذرات در سایر نقاط است. این ویژگی به فرایند کنترل رشد و بهینه‌سازی شرایط سنتز وابسته است. مطابقت با نتایج XRD: مقاله‌های جدید نشان می‌دهند که اندازه ذرات به‌دست‌آمده از SEM کاملاً با اندازه‌های تخمینی XRD بر اساس



شکل ۵ - طیف FT-IR نمونه نانو ذره روی اکسید

یک 1386 cm^{-1} به نوسانات گروه‌های C-N یا خمشی O-H در ساختار پلی‌فونلی یا آمیدی مربوط است که به بقایای عصاره‌های گیاهی یا ترکیبات پایدارکننده اشاره دارد. پیک 1618 cm^{-1} این ناحیه اغلب به ارتعاشات کششی پیوند (C=O) آمید یا کربونیل یا ارتعاشات خمشی (O-H) مولکول آب یا گروه‌های هیدروکسیل سطحی اشاره دارد. پیک 3459 cm^{-1} مربوط به پیوند کششی (O-H) آب جذب شده یا گروه‌های هیدروکسیل سطحی نانوذرات است، که اغلب نشانه حضور آب یا بقایای هیدروکسی در سطح نانوذرات اکسید روی است [۲۶].

بررسی نتایج حاصل از الگوی پراش اشعه ایکس

بررسی صحت سنتز یک نانوذره پودری و تعیین اندازه‌ی آن، تکنیک پراش پرتوی x یکی از پر قدرت‌ترین روش‌های مورد استفاده است. پس از سنتز نانوذرات و رسم طیف پراش پرتوی x آن همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده شده است. طیف به‌دست آمده با طیف گزارش شده برای روی اکسید در مقالات [۲۸] تقریباً نزدیک است. شکل ۶ طیف بدست آمده برای نانوذره روی اکسید را نشان می‌دهد. مقایسه طیف‌های ارائه شده در این پروژه بیانگر سنتز نانوذره روی اکسید توسط عصاره متانولی گیاه کاکتوس مشخص شده است. طیف XRD ارائه‌شده مربوط به نانوذرات اکسید روی است که ساختار بلوری مشخص و منظم آن را نشان می‌دهد. پیک‌های برجسته در زوایای 2θ به ترتیب در حدود 31.8° ، 34.4° ، 36.3° ، 47.5° ، 56.6° ، 62.8° ، 66.3° ، 67.9° ، 69.0° ، 72.6° و 76.9° مشاهده می‌شوند که به ترتیب مربوط به صفحات بلوری (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۱۰۲)، (۱۱۰)، (۱۰۳)، (۲۰۰)، (۱۱۲)، (۲۰۱)، (۰۰۴) و (۲۰۲) هستند. این الگو نشان‌دهنده ساختار هگزاگونال و نوع وورتزیت^۱ ZnO است که شایع‌ترین ساختار کریستالی ZnO می‌باشد. همچنین اندازه سایز

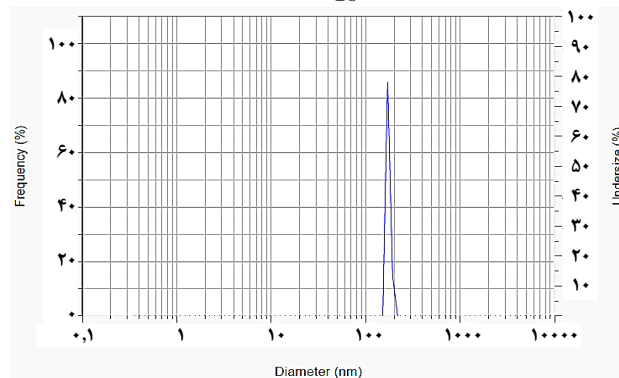
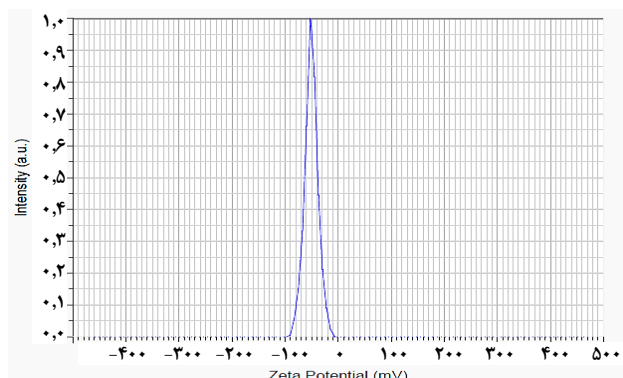
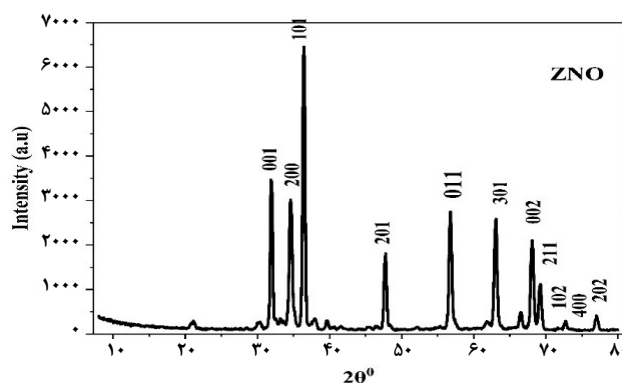
(۱) wurtzite

(۳) DLS

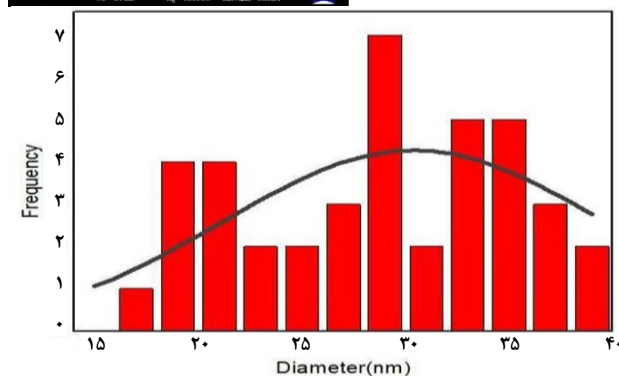
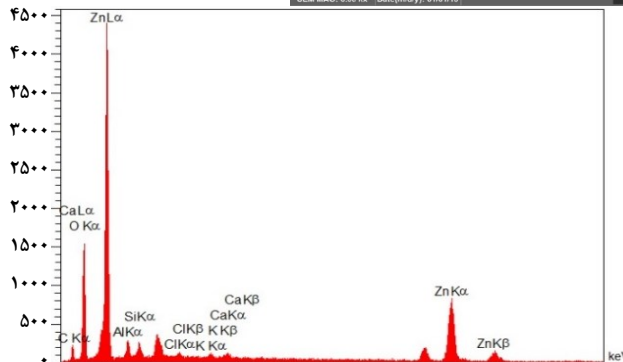
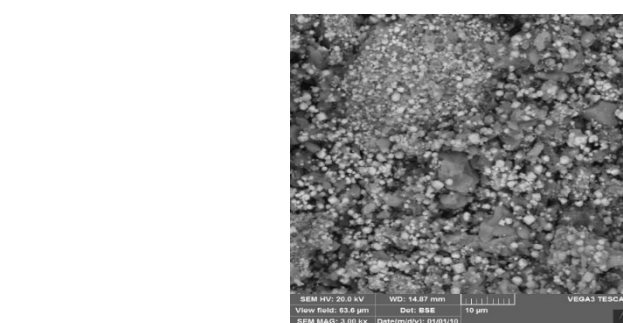
(۲) hydrodynamic

(۴) agonal

No.	B obs. [°2Th]	B std. [°2Th]	Peak pos. [°2Th]	B struct. [°2Th]	Crystallite size [?]
۱	۰/۴۸	۰/۰۴۸	۳۶/۴۳۶	۰/۴۳۲	۱۹۴
۲	۰/۲۸۸	۰/۰۲۹	۳۱/۹۲۵	۰/۲۵۹	۳۱۹
۳	۰/۵۲۸	۰/۰۵۳	۵۶/۷۵	۰/۴۷۵	۱۹۰
Angstrom=۲۳۴					
Nanoparticle size=۲۳ nm					



شکل ۶ - طیف XRD و DLS نمونه نانوذرات روی اکسید



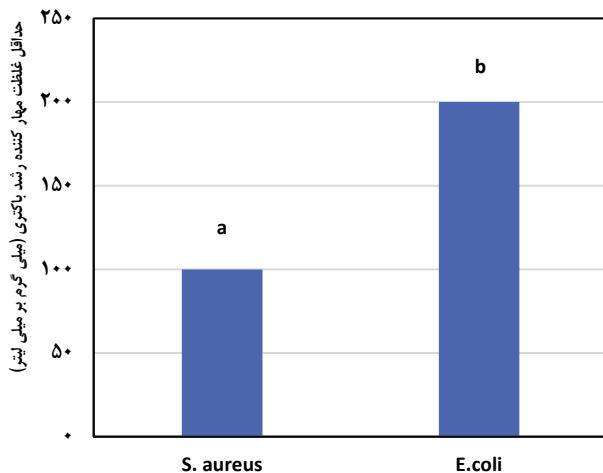
شکل ۷ - تصویر SEM و EDS و هیستوگرام نانوذرات روی اکسید

و خلوص اکسید روی در نانوذرات است. پیک‌های Zn Lα و Zn Kα/Kβ با شدت بسیار بالا ظاهر شده‌اند که نشان‌دهنده حضور مقدار قابل توجهی از عنصر روی در نمونه است. این پیک‌ها نشان‌دهنده تشکیل موفق نانوذره روی و غالب بودن فلز روی در ساختار هستند.

قانون شرر و مدل^۱ مطابقت دارد و تاییدکننده ساختار بلوری و اندازه داده‌شده است [۲۹-۳۱].

طیف EDS نانوذره اکسید روی عناصر و ترکیبات تشکیل‌دهنده نمونه را نشان می‌دهد و یکی از روش‌های معتبر برای تأیید حضور

(۱) Williamson-Hall



شکل ۸ - نمودار حداقل غلظت نانوذرات روی اکسید برای دو باکتری گرم مثبت و منفی

فیلم هم کم شده است. افزودن CA به طور قابل توجهی ضخامت فیلمها را افزایش داد زیرا محتوای ماده خشک با غلظت‌های بالاتر CA به طور مداوم افزایش یافت. مقدار رطوبت فیلمها حاوی عصاره کاکتوس و پکتین و نانوذره روی بر پایه نشاسته ساگو نشان می‌دهد و در محدوده ۱۱/۶۸ تا ۱۴/۳۵ درصد قرار دارد که نمونه CA4 بالاترین مقدار را نشان می‌دهد و نمونه CA2 کمترین مقدار رطوبت را دارد. کاهش اولیه رطوبت در نمونه CA2 احتمالاً به علت افزایش پیوندهای هیدروژنی قوی‌ترین ترکیبات موجود در عصاره (مانند پلی‌فنولها و گروه‌های هیدروکسیل) و ماتریس پلیمر ساگو است. این پیوندهای قوی‌تر باعث کاهش دسترسی مولکول‌های آب به شبکه پلیمری شده و توانایی جذب آب نمونه را کاهش می‌دهند. سپس افزایش مجدد رطوبت در نمونه CA4 می‌تواند به دلیل اشباع شدن پیوندهای هیدروژنی و تغییر ساختار ساختاری ماتریس فیلم باشد که امکان نگهداری بیشتر آب را فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، در ابتدا عصاره منافذ و فضای دسترسی آب را به صورت موثر کاهش می‌دهد، اما در مراحل بعدی تغییرات ساختاری شبکه باعث افزایش ظرفیت جذب آب توسط فیلم می‌شود. این تغییرات در حد نوسانات طبیعی متداول در تهیه فیلمهای زیستی است. این تغییرات رطوبتی، به ویژه در نمونه‌های حاوی نانوذرات اکسید روی، استفاده از نانوذرات اکسید روی به مقدار ۱۲/۸۷ در فیلمهای زیستی تخریب پذیر باعث کاهش رطوبت شده است. در ابتدا، نانوذرات اکسید روی به دلیل خاصیت آب‌گریزی نسبی و ایجاد ساختار متراکم‌تر در ماتریس فیلم، باعث کاهش نفوذ و جذب مولکول‌های آب به داخل فیلم می‌شوند. همچنین حضور این نانوذرات باعث پر شدن منافذ ریز و کاهش فضاهای خالی در ساختار فیلم می‌گردد که از تجمع آب جلوگیری می‌کند و در نتیجه، رطوبت نمونه کاهش می‌یابد. همچنین، نانوذرات اکسید روی می‌تواند

پیک O Kα: حضور اکسیژن به عنوان عنصر اصلی اکسید تأیید می‌شود و با نسبت بالا معمولاً تتوری Zn % ۸۰ و O % ۲۰ برای ZnO خالص مشاهده می‌گردد. پیک‌های Ca، Si، Al، Cl و K: این عناصر با شدت بسیار کمتر نسبت به Zn و O دیده می‌شوند و احتمالاً به ناخالصی‌های سطحی، محصولات فرعی سنتز یا مواد زمینه/پوشش‌دهنده مربوط هستند، اما تأثیر زیادی بر خلوص ZnO ندارند. نمایش خلوص: وجود غالب پیک‌های Zn و O همراه با شدت پایین سایر عناصر نشان‌دهنده خلوصی بالای نانوذره ZnO است. اگر شدت عناصر دیگر کم باشد، نمونه را می‌توان با خلوص مناسب جهت مصارف علمی و صنعتی تلقی کرد [۳۲].

نمودار هیستوگرام (توزیع اندازه) نشان می‌دهد که میانگین اندازه‌ی ذرات ZnO در محلول ۲۲-۲۵ نانومتر است. توزیع اندازه‌ها باری گزارش شده که نشان‌دهنده پراکندگی کم و یکنواختی خوب اندازه‌ی ذرات است. این یافته با تصاویر SEM که ذرات ZnO را به صورت تقریباً کروی، منفصل و بدون آگلومره شدن نشان می‌دهد، همخوانی دارد.

بررسی نتایج حاصل آنتی باکتریال

شکل ۸ نشان داد فیلم CAZnONPs حاوی نانوذرات روی هاله عدم رشد ۲۰۰ mm² علیه S. aureus و ۱۰۰ mm² علیه E. coli ایجاد کرد (p<0.05). فیلم‌های حاوی نانوذرات اکسید روی فعالیت آنتی‌باکتریال قابل توجهی از خود نشان دادند. این اثر آنتی‌باکتریال به دلیل وجود یون‌های Zn²⁺ و همچنین تولید گونه‌های فعال اکسیژن^۲ توسط ZnO در محیط آبی است که باعث آسیب به غشای سلولی، DNA و پروتئین‌های باکتری می‌شود. عصاره متانولی برگ کاکتوس نیز حاوی ترکیبات فنولی، اسیدهای چرب و لاکتون‌ها طبق نتایج (GC-MASS) بود که خود به تنهایی خاصیت ضدباکتریایی دارند. ترکیب نانوذره روی و عصاره کاکتوس اثر سینرژیستیک (هم‌افزایی) نشان داد یعنی فعالیت ضدباکتریایی فیلم‌های ترکیبی بیشتر از هر یک از جزءهای جداگانه بود [۳۳].

بررسی خواص شیمیایی فیلم بیوکامپوزیت خوراکی‌ها

بررسی نتایج ضخامت و رطوبت و حلالیت فیلم بیوکامپوزیت خوراکی‌ها

جدول ۳ نتایج مربوط به ضخامت فیلم‌های مبتنی بر نشاسته ساگو از ۰،۱۳ میلی‌متر تا ۰،۱۶ میلی‌متر برای CA (۰،۲۵) و ۰،۱۶ میلی‌متر برای CAZnONPs متغیر بود. افزودن CA و CAZnONPs به فیلم ساگو، ضخامت را افزایش داد که ممکن است با پیوندهای عرضی مختلف ایجاد شده بین ساگو و CA و CAZnONPs مرتبط باشد. پس از افزودن ZnONPs، افزایش جزئی در ضخامت فیلم‌ها مشاهده شد $p > 0.05$ که با یافته‌های کار قبلی [۳۴] همسو است و همچنین برای CA2 چون مقدار رطوبت کمتر می‌شود ضخامت

(۱) narrow distribution

(۲) ROS

جدول ۴ - مقادیر رطوبت حلالیت و ضخامت فیلم ها

فیلم‌ها	مقدار رطوبت (%)	حلالیت (%)	ضخامت Mm
CA(0)	$11/68^{cd} \pm 0/091$	$55/26^e \pm 0/625$	$0/13^b \pm 0/007$
CA(1)	$13/17^b \pm 0/491$	$70/04^d \pm 0/365$	$0/14^{ab} \pm 0/011$
CA(2)	$11/21^d \pm 0/395$	$51/16^f \pm 0/284$	$0/13^b \pm 0/008$
CA(3)	$13/35^b \pm 0/391$	$85/29^b \pm 0/653$	$0/15^a \pm 0/010$
CA(4)	$14/35^a \pm 0/670$	$91/35^a \pm 0/368$	$0/15^a \pm 0/010$
CA(5)ZnONPs	$12/87^b \pm 0/650$	$81/32^c \pm 0/569$	$0/16^a \pm 0/010$

و حلالیت آن کاهش یابد. علاوه بر این، حضور نانوذرات ZnO به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی خاص خود، خصوصاً سطح بالای انرژی و واکنش پذیری، می‌تواند باعث تشکیل لایه محافظی شود که اجازه مهاجرت مولکول‌های آب به داخل فیلم را محدود می‌کند. همچنین ترکیبات عصاره گیاهی همراه نانوذرات می‌توانند به صورت کووالانسی یا هیدروژنی با ماتریس فیلم پیوند خورده و مقاومت فیلم در برابر حل شدن افزایش یابد [۳۷].

بررسی نتایج FTIR فیلم‌ها

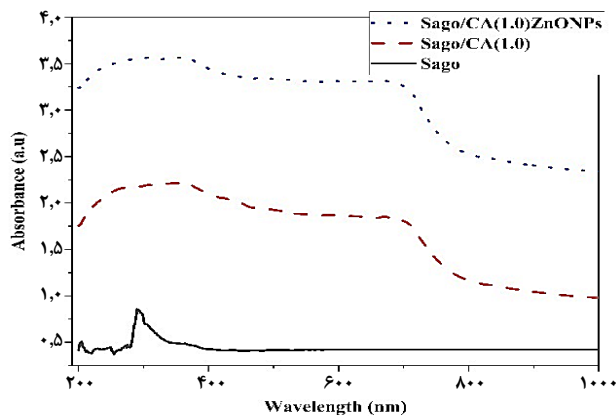
با بررسی شکل ۹ نمودار FTIR را نشان می‌دهد که محور افقی: عدد موج^۳، از حدود ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ cm^{-1} محور عمودی: میزان عبور^۴ که نتایج به این صورت است نشانسته ساکو: حضور باندهای گسترده در حدود $2971-3603 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های OH نشانسته است که نشان‌دهنده ساختار پلی‌هیدروکسی است. باندهای 2907 cm^{-1} ارتعاش کششی (C-H) و 1642 cm^{-1} ارتعاش خمشی H-O-H آب نیز مشاهده می‌شوند و پیک‌های $1228-982 \text{ cm}^{-1}$ ارتعاش C-O-C، C-O و پیوندهای گلیکوزیدی نشانسته ناحیه اثر انگشت نشانسته و پلی‌ساکاریدها است. که برای پلیمرهای طبیعی مثل نشانسته معمول هستند. اضافه شدن عصاره گیاهی کاکتوس موجب بروز باندهای جدید یا تغییر شدت باندها در اطراف $1600-1700 \text{ cm}^{-1}$ ارتعاش کششی C=O، ترکیبات فنولی و کربوکسیلیک اسید $1500-1200 \text{ cm}^{-1}$ (C-N و C-O)، حضور پلی‌ساکاریدها، گلیکوزیدها و آمین‌ها می‌شود. عصاره کاکتوس باعث جابه‌جایی پیک OH ($3596-3052 \text{ cm}^{-1}$) به سمت پایین‌دست^۵ حدود $10-20 \text{ cm}^{-1}$ و کاهش شدت پیک‌های C-O/C-O-C ($1200-1100 \text{ cm}^{-1}$) می‌شود، که نشان‌دهنده تشکیل هیدروژن باندینگ بین پلی‌فنول‌های عصاره و ماتریکس نشانسته-پکتین است. حدود 1200 cm^{-1} از مشتقات فنلی عصاره ظاهر می‌شوند. این برهمکنش‌ها اتصال متقاطع را تقویت کرده و حلالیت آب را از ۵۵٪ (CA0) به ۵۱٪ (CA2) کاهش می‌دهد [۳۸-۳۹].

به واسطه برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک و تشکیل پیوندهای ضعیف با گروه‌های عاملی پلیمری مانع از ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی‌تر با آب شوند که این امر به کاهش رطوبت جذب شده منجر می‌شود. این اثر به ویژه در غلظت‌های کم تا متوسط نانوذرات در فیلم‌ها مشاهده می‌شود و در غلظت‌های بالاتر می‌تواند تغییراتی در ساختار شبکه فیلم ایجاد کند که بر خواص جذب آب تأثیرگذار باشد. نشان‌دهنده تأثیر ترکیب مواد افزودنی بر میزان جذب و نگهداری آب در فیلم‌ها است. افزایش یا کاهش رطوبت به واسطه میزان جذب مولکول‌های آب توسط گروه‌های فعال و همچنین تأثیر ساختاری ماتریس پلیمری صورت می‌گیرد [۳۵-۳۶].

کاهش حلالیت فیلم‌های زیستی در جدول ۴ نشان داده شده است فیلم حاوی عصاره کاکتوس مانند فیلم CA2، به دلیل ایجاد برهم‌کنش‌های قوی‌تر بین عصاره و ماتریس پلیمری است که ساختار شبکه فیلم را مستحکم‌تر و نفوذپذیری آن را به آب کاهش می‌دهد و تعاملات هیدروژنی بهینه بین فنول‌ها/لاکتون‌های عصاره (GC-MASS) و گروه‌های OH نشانسته ساگو/پکتین ایجاد می‌کند، ساختار فیلم رامترکم و آب‌گریز می‌نماید. در غلظت‌های بالا ($1.0-0.75\%$) منجر به اشباع شبکه هیدروژنی و فاز جدایش هیدروفیل^۱ می‌شود، نفوذ آب را تسهیل می‌کند. کاهش حلالیت فیلم‌های حاوی نانوذرات ZnO می‌تواند ناشی از سه مکانیزم اصلی باشد: (۱) برقراری پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های OH- نشانسته/پکتین و سطح نانوذرات ZnO، که منجر به کاهش گروه‌های قطبی آزاد و کاهش جذب آب می‌شود؛ (۲) نقش نانوذرات به‌عنوان هسته‌های بلوری‌ساز که ساختار نیمه‌بلورین ماتریس را تقویت کرده و نفوذپذیری آب را کاهش می‌دهند؛ و (۳) ایجاد یک شبکه سدی فیزیکی در ماتریس به دلیل پراکندگی یکنواخت نانوذرات که مسیر انتشار مولکول‌های آب را طولانی‌تر می‌کند. نانوذرات باعث ایجاد پیوندهای متقاطع^۲ بین زنجیره‌های پلیمری و همچنین اشغال منافذ ریز در ماتریس فیلم می‌شوند که منجر به کاهش تمایل فیلم به انحلال در آب می‌گردد. این اثر باعث می‌شود که آب به سختی به داخل فیلم نفوذ کرده

(۱) plasticizing effect
(۳) Wavenumber, cm^{-1}
(۵) red-shift

(۲) cross-linking
(۴) Transmittance, %



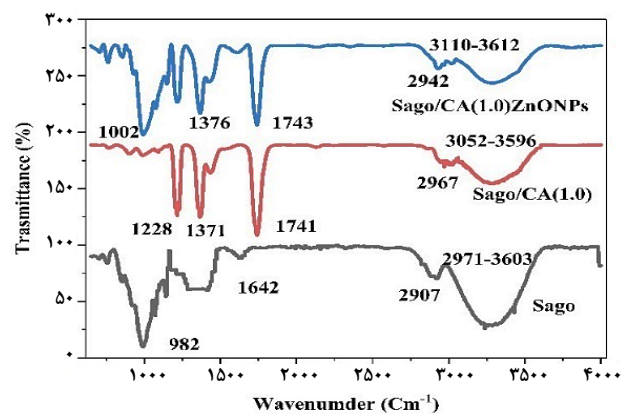
شکل ۱۰ - طیف UV فیلم های ساگو و عصاره کاکتوس و نانوذرات اکسید روی

باعث افزایش جذب شدید و ظهور پیک مشخص جذب در ناحیه فرابنفش (حدود ۳۶۰-۳۸۰ نانومتر) می شود که به دلیل گذار انرژی باند-گپ نانوذره اکسید روی است. حضور این باند بیانگر موفقیت آمیز بودن تثبیت ZnONPs در ماتریس بیوپلیمر است و معمولاً همراه افزایش توانایی محافظت UV و خواص آنتی باکتریال می باشد [۴۵].

بررسی نتایج TGA فیلم ها

با توجه به نمودار شکل ۱۱ هر دو نمونه با افزایش دما، وزن خود را از دست می دهند. این کاهش وزن معمولاً ناشی از تبخیر آب و تجزیه مواد آلی است. مقایسه پایداری حرارتی: نمونه Sago/CAZnONPs (خط قرمز) در تمام دماها، وزن باقی مانده بیشتری نسبت به نمونه Sago (خط مشکی) دارد. این یعنی در هر دمایی که اندازه گیری شده، نمونه حاوی نانوذرات کمتر از دست داده است. این موضوع به وضوح در دماهای بالاتر مثلاً بالای 300°C قابل مشاهده است. در حدود 700°C ، نمونه Sago وزن باقی مانده ای نزدیک به صفر دارد، در حالی که نمونه Sago/CAZnONPs هنوز حدود ۲۰٪ وزن اولیه خود را حفظ کرده است. وجود نانوذرات اکسید روی در فیلم ساگو، پایداری حرارتی آن را به طور قابل توجهی افزایش می دهد. این افزایش پایداری می تواند به دلایل مختلفی باشد از جمله نانوذرات می توانند مسیرهای انتشار گازهای تجزیه شده را مسدود کنند و سرعت تجزیه را کاهش دهند و ممکن است تعاملات شیمیایی بین پلیمرهای ساگو و نانوذرات اکسید روی منجر به تشکیل ساختارهای پایدارتر شود. کاهش نفوذپذیری و از نفوذ گرمای محیط جلوگیری کنند. هر دو نمونه در دمای پایین (حدود 100°C - 150°C) شروع به از دست دادن وزن می کنند که احتمالاً مربوط به تبخیر آب آزاد است.

سپس در دمای بالاتر حدود 250°C - 400°C یک افزایش شدید در نرخ از دست دادن وزن مشاهده می شود که نشان دهنده تجزیه حرارتی



شکل ۹ - طیف FTIR فیلم های ساگو، عصاره کاکتوس و نانوذرات اکسید روی

با افزودن نانوذرات اکسید روی به ترکیب نشاسته و عصاره گیاهی، شدت باندهای OH کاهش یافته و باند مشخصه Zn-O ظاهر می شود که بیانگر تعامل فیزیکی و پیوندهای هیدروژنی میان نشاسته، عصاره گیاهی و سطح ZnO است. حضور عصاره گیاهی موجب بهبود پایداری سازی نانوذرات و تغییر شدت یا جابجایی باندهای FTIR، خصوصاً در ناحیه های OH و C=O می شود که بنابر رفرنس های جدید، به دلیل وجود ترکیبات زیستی مثل پلی فنول ها و فلاونوئیدها است [۴۳-۴۰].

بررسی نتایج UV فیلم ها

در شکل ۱۰ طیف UV-Vis سه نمونه فیلم شامل نشاسته ساگو^۱، نشاسته+عصاره کاکتوس^۲، و نشاسته+عصاره کاکتوس+نانوذره^۳ نشان داده شده است. فیلم نشاسته ساگو: جذب به نسبت ضعیف در ناحیه مرئی و فرابنفش دارد که نشانه ماهیت عایق/شفاف بودن آن است و باند مشخصی برای جذب نانوذرات دیده نمی شود. این رفتار برای فیلم های بیوپلیمر پایه مانند نشاسته طبیعی معمول است [۴۴]. فیلم پایه نشاسته ساگو $\lambda_{\text{max}} = 291\text{ nm}$ ، $\text{Abs} = 0.70$ و فیلم حاوی عصاره کاکتوس و پکتین $\lambda_{\text{max}} = 315\text{ nm}$ ، $\text{Abs} = 1.30$ و فیلم حاوی نانوذرات (NPs): $\lambda_{\text{max}} = 370\text{ nm}$ ، $\text{Abs} = 1.90$ این مقادیر نشان می دهند که با افزودن عصاره گیاهی و نانوذرات اکسید روی جابه جایی قابل توجهی در λ_{max} به سمت طول موج های بلندتر (جابجایی سرخ) رخ داده است که مطابق با مرتبط موجود در خصوص تعاملات هیدروژنی و افزایش مزاحمت فضایی در ماتریس فیلم است. همچنین، افزایش جذب در ناحیه UV نشان دهنده بهبود قابلیت مهار اشعه UV توسط فیلم های کامپوزیتی است.

اضافه شدن عصاره کاکتوس، میزان جذب نور در کل طیف افزایش می یابد (به ویژه در ناحیه ۲۵۰-۴۰۰ نانومتر) که احتمالاً مربوط به آنتی اکسیدان ها، پلی فنول ها و فلاونوئیدهای موجود در عصاره کاکتوس است. و افزودن نانوذره ترکیب نانوذره با فیلم

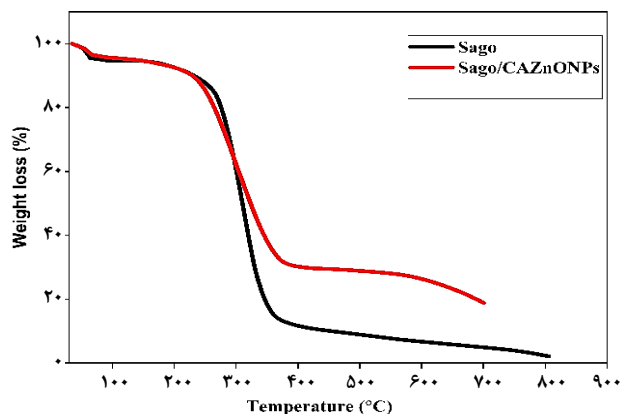
(۱) Sago
(۲) Sago/CA/ZnO NPs

(۳) Sago/CA

و بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن‌ها را می‌توان به حضور این ترکیبات شناسایی شده در عصاره کاکتوس نسبت داد و نانوذرات و توزیع یکنواخت این ذرات در ماتریس پلیمر بود. فیلم‌های تهیه شده تغییراتی در رطوبت و حلالیت نشان دادند و می‌توانند به عنوان یک گزینه بالقوه برای بسته بندی زیست تخریب پذیر مورد بررسی بیشتر قرار گیرد به علاوه، حضور ترکیبات فعال زیستی موجود در عصاره برگ کاکتوس و نانوذرات اکسید روی می‌تواند در تقویت خاصیت ضدباکتریایی فیلم‌های تهیه شده نقش داشته باشد و این موضوع، پتانسیل بررسی تأثیر این فیلم‌ها بر ماندگاری مواد غذایی بسته بندی شده را در مطالعات آینده نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که این نانوکامپوزیت‌های زیستی پتانسیل بالایی برای کاربردهای پیشرفته در بسته بندی مواد غذایی با عملکرد بهبود یافته و زیست تخریب پذیری مطلوب دارند، که علاوه بر حفظ کیفیت و ایمنی مواد غذایی، می‌تواند به کاهش آلودگی پلاستیکی محیط زیست کمک کند. بنابراین، این نوع فیلم‌ها به عنوان جایگزین‌هایی سازگار با محیط زیست برای بسته بندی‌های سنتی معرفی می‌شوند که هم اهداف اقتصادی و هم زیست محیطی را پوشش می‌دهند. برخلاف مطالعات قبلی که عمدتاً از نشاسته‌های رایج (مانند ذرت یا کاسوا) همراه با یک افزودنی فعال (مانند عصاره یا نانوذرات) استفاده کرده اند، این مطالعه برای اولین بار ترکیبی از نشاسته ساگو، پکتین بازیافت شده از پوست گریپ فروت، عصاره متانولی برگ کاکتوس و نانوذرات اکسید روی را در یک فیلم زیست تخریب پذیر یکپارچه کرده است. این رویکرد نه تنها از ضایعات کشاورزی بهره برداری می‌کند، بلکه فیلم نهایی را به یک سیستم چندمنظوره با خواص فیزیکوشیمیایی و محافظت در برابر UV تبدیل می‌کند. هیچ یک از آزمایش‌های ضد میکروبی، ضد قارچی، یا ماندگاری غذایی به صورت مستقیم در این مطالعه انجام نشده است؛ بنابراین، هرگونه ادعای مبنی بر افزایش ماندگاری غذا یا کاربرد مؤثر در بسته بندی فعال تنها بر اساس شواهد غیرمستقیم مانند حضور ترکیبات فنولی شناخته شده در عصاره گیاه کاکتوس و خاصیت ضد میکروبی ZnONPs گزارش شده است. این پتانسیل لازم است در مطالعات آتی با طراحی دقیق آزمایش‌ها (شامل کنترل منفی: فیلم پایه بدون افزودنی همان CA(0) و کنترل مثبت: فیلم حاوی نگهدارنده استاندارد) مورد تأیید قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از معاونت پژوهشی و گروه شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم شهر که امکانات لازم برای اجرای پروژه فوق را فراهم نمودند کمال قدردانی و تشکر را دارند.



شکل ۱۱ - طیف TGA فیلم‌های ساگو و عصاره کاکتوس و نانوذرات اکسید روی

مواد آلی (مانند پلی‌مرهای ساگو) است. این مرحله در نمونه Sago خالص شدیدتر و سریع‌تر اتفاق می‌افتد. این نمودار TGA به وضوح نشان می‌دهد که ادغام نانوذرات اکسید روی در ماتریس فیلم ساگو، منجر به بهبود قابل توجهی در پایداری حرارتی فیلم می‌شود. نمونه Sago/CAZnONPs در مقایسه با فیلم ساگو خالص، در دماهای بالاتر وزن بیشتری را حفظ می‌کند و نرخ تجزیه آن کندتر است. این ویژگی، کاربردهای عملی فیلم‌های بیوپلیمری را در شرایطی که نیاز به مقاومت حرارتی وجود دارد، بهبود می‌بخشد [۴۶].

نتیجه گیری

در این مطالعه، فیلم‌های زیست تخریب پذیر بر پایه نشاسته ساگو با افزودن عصاره متانولی برگ کاکتوس، پکتین و نانوذرات اکسید روی تهیه شدند که هدف آن بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی فیلم‌ها و عرضه جایگزینی سازگار با محیط زیست برای بسته بندی‌های مبتنی بر پلاستیک‌های نفتی بود. تحلیل‌های ساختاری با استفاده از ATR-FTIR، XRD و SEM نشان دهنده تغییرات در ساختار فیلم‌ها به دلیل حضور عصاره گیاه همان گونه که نتایج GC-MASS نشان داد، عصاره متانولی برگ کاکتوس حاوی ترکیباتی از جمله اسیدهای چرب و مشتقات فنولی است که در مطالعات پیشین به عنوان ترکیبات دارای فعالیت آنتی اکسیدانی و ضدباکتریایی گزارش شده اند. حضور این ترکیبات در ماتریس نشاسته-پکتین می‌تواند از یک سو با ایجاد برهم کنش‌های هیدروژنی و هیدروفوب بین زنجیره‌های پلیمری و مولکول‌های زیست فعال، به بهبود پایداری ساختاری و کاهش حلالیت فیلم کمک کند و از سوی دیگر با اختلال در نفوذپذیری غشای سلولی میکروارگانیسم‌ها، رشد باکتری‌ها را مهار نماید. بنابراین، بخش مهمی از خاصیت بالقوه فعال بودن فیلم‌ها

مراجع

- [1] Shafi H., Bajpai M., A Review on Importance of Biodegradable Packaging for Foods and Pharmaceuticals. *Current Nutrition & Food Science*, **19(1)**: 9-21 (2023).
- [2] Díaz-Montes E., Polysaccharide-Based Biodegradable Films: An Alternative in Food Packaging. *Polysaccharides*. **3(4)**: 761-775 (2022).
- [3] Almasi H., Recent Advances in Edible Active Packaging Based on Biopolymers: A Review." *Food Bioscience*, **57**: 103620 (2024).
- [4] Deng J., Zhu E.Q., Xu G.F., Naik N., Murugadoss V., Overview of Renewable Polysaccharide-Based Composites for Biodegradable Food Packaging Applications. *Green Chemistry*, **24(2)**: 480-492 (2022).
- [5] Putra O.N., Musfiroh I., Elisa S., Musa M., Ikram E.H.K., Chaidir C., Muchtaridi M., Sodium Starch Glycolate (SSG) from Sago Starch (Metroxylon sago) as a Superdisintegrant: Synthesis and Characterization. *Molecules*, **29**: 151 (2023).
- [6] Wade D.B., Wada OZ., Ige AO., Advances and Recent Trends in Plant-Based Materials and Edible Films: A Mini-Review. *Frontiers in Chemistry*, **12**: (2024).
- [7] Gupta D., Lall A., Kumar S., Patil T.D., Plant-Based Edible Films and Coatings for Food-Packaging Applications: Recent Advances, Applications and Trends. *Sustainable Food*, **2**: 1428-1455 (2024).
- [8] Abbas E.Y., Ezzat M.I., Hefnawy HM E.I., An Overview and Update on the Chemical Composition and Potential Health Benefits of Opuntia Ficus-Indica (L.) Miller. *Journal of Food. Biochemistry*, (2022).
- [9] Nie X., Shi H., Wang F., You C., Zhang D., Xiao Z., Biodegradable Li., chitosan-Based Biofilms Incorporated with Camellia Oleifera Residue Protein for Food Packaging. *Food Hydrocolloids*, **157**: (2024)
- [10] Mahardika M., Firmanda A., Pratama AW., Antimicrobial and Antioxidant of Iocomposite Food Packaging Based on Ginger Tubers (Zingiber Officinale). *Plant Tuber and Root*, **9**: 39-59 (2025).
- [11] Syarifa R., Esmaili Y., Jafarzadeh S., Garavand F., Mahmud S., An Investigation of the Morphological, Thermal, Mechanical, and Barrier Properties of an Active Packaging Containing Micro-and Nano-Sized ZnO Particles. *AriffinFood Science & Nutrition*, **11**: 7373-7382 (2023).
- [12] Mariia D., Anna K., Mary C.h., Daniel P., Maya J., Mpitloane J., Sabu T., Anastasia P., Edible Carrageenan Films Reinforced with Starch and Nanocellulose: Development and Characterization, **15(22)**: 15817 (2023).
- [13] Asha K., Shilpa K., Rahul S.h., Advanced Biodegradable Starch-Based Nanocomposite Films Incorporating Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Efficacy in Antibacterial Food Packaging Applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13(3)** (2025).

- [۱۴] حسن رضایی نیا، محمد امین مشهدی، تولید فیلم خوراکی بر پایه نشاسته ساگو حاوی عصاره گیاه سریش: ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی و ضد میکروبی، دومین همایش ملی توسعه کشاورزی با رویکرد فناوری‌های (۱۴۰۳)
- [15] Karmakar B., Sarkar S., Chakraborty R., Saha S.P., Thirugnanam, A. Roy P.K., Roy S., *Starch-Based Biodegradable Films Amended with Nano-Starch and Tannic Acid-Coated Nano-Starch Exhibit Enhanced Mechanical and Functional Attributes with Antimicrobial Activity, Carbohydrate Polymers*, **341**: 122321 (2024).
- [16] Alireza B.A., Homa B., Nurul H., Hendrix Y.S., Abdorreza M.N., *Sago Starch Bionanocomposite Films With Peganum harmala and TiO₂: Enhancing Oxidative Stability and Quality of Chicken Fillets. Food Sci Nutr*, **14(1)**: e71477 (2026).
- [17] Aslam R., Sivapragasam K.G., Lawal N., Ahmed Z.F., Maqsood S., *Bionanocomposite Films from Camel Skin Gelatin Reinforced with Tannic Acid and Date Seed Nanocellulose, Food Biophysics*, **20(3)**: 119 (2025).
- [18] Aispuro H., Marcela J., Vergara G., Feliznando I., Cárdenas T., Miguel A., *Cactaceae Plants as Sources of Active Bioavailable Phytochemicals. Food Function*. (2022).
- [19] Duwee Y.S., Kiew P.L., Yeoh W.M., *Multi-Objective Optimization of Pectin Extraction from Orange Peel Via Response Surface Methodology: Yield and Degree of Esterification, Journal of Food Measurement and Characterization*. **16**: 1710-1724 (2022).
- [20] Nishant S., Manish Kumar S., Ravi Kumar Y., Zeba A., Jyotsna R., *Green Synthesis and Characterization of Nano Zinc Oxide and Comparative Study of Its Impact on Germination and Metabolic Activities of Solanum Lycopersicum L. J VEGETOS*, **38**: 744-760 (2025)
- [21] Mohammad javad M., Masoumeh H., Sadegh S., *The Effect of Flaxseed Extract Incorporated with Nano ZnO and ZnO-Mg on the Physicochemical, Mechanical, and Antioxidant Properties of Sago Starch Films, Journal of Food Measurement and Characterization*, **18(8)**: 6803-6815 (2024).
- [22] Fatemeh S. E., Masoumeh H., Mohammad Reza Z., Mohammad A Kh., *Physicochemical Properties of Biodegradable Edible Films Developed from Sago Starch: Effects of Phycocyanin, Nano-ZnO, and a Combination of Experiments and Theory. International Journal of Biological Macromolecules*, 144947 (2025).
- [23] Tahereh H., Navabeh N., Daryosh Z., *Synthesis of Indole Derivatives using Biosynthesized ZnO-CaO Nanoparticles as an Efficient Catalyst. Journal of Nano Research*, **66**: 61-71 (2021).
- [24] Jobe M.C., Mthiyane D.M.N., Mwanza M., Onwudiwe DC., *Biosynthesis of Zinc Oxide and Silver/Zinc Oxide Nanoparticles from Urginea Epigea for Antibacterial and Antioxidant Applications. Heliyon*, (2022).
- [25] Subramaniam H., Lim CK., Tey L.H., Wong L.S., Djearmane S., *Oxidative Stress-Induced Cytotoxicity of HCC2998 Colon Carcinoma Cells by ZnO Anoparticles Synthesized from Calophyllum Teysmannii. Scientific Reports*, (2024).

- [26] Nkemzi A.Q., Okaiyeto K., Oyenih O., Opuwari C.S., Ekpo O.E., Oguntibeju O., *Antidiabetic, Anti-Inflammatory, Antioxidant, and Cytotoxicity Potentials of Green-Synthesized Zinc Oxide Nanoparticles using the Aqueous Extract of Helichrysum*. *Biotech*, (2024).
- [27] Azmat A., Tanveer Y., Yasmin H., Hassan M.N., *Coactive Role of Zinc Oxide Noparticles and Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Mitigation of Synchronized Effects of Heat and Drought Stress in Wheat Plants*. **297**: (2022).
- [28] Agarwal H., Shanmugam V.K., *A Review on Anti-Inflammatory Activity of Green Synthesized Zinc Oxide Nanoparticle: Mechanism-Based Approach- Bioorganic chemistry*, (2020).
- [29] Al-Hazm G.H., El-Desouky M.G., El-Bindary A.A., *Synthesis, Characterization and Microstructural Evaluation of ZnO Nanoparticles by William-Hall and Size-Strain Plot Methods*. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, (2022).
- [30] Abdullah J.A.A., Rosado M.J., *A Guerrero Eco-Friendly Synthesis of ZnO-Nanoparticles using Phoenix Dactylifera L., Polyphenols: Physicochemical, Microstructural, and Functional Assessment*. (2023).
- [31] Bueno C., Luna. A., Flore G., Juárez H., Pacio M., Pére R., Flores-Méndez J., Maestre D., *Structural, Morphological, and Optical Properties of Nano- and Micro-Structures of ZnO Obtained by the Vapor-Solid Method at Atmospheric. Pressure And. Crystals*, (2024).
- [32] Ghassan O.A., Fakih A., Ilyas R.A., Huzaifah M.R.M., El-Shafay A.S., *Recent Advances in Sago (Metroxylon Sagu) Fibres, Biopolymers, Biocomposites, and Their Respective Applications in Industry: A Comprehensive Review*. *International Journal of Biological Macromolecules*, **269**(1): (2024).
- [33] Wu Y., Chen X., He J., *Effects of Cinnamon Essential Oil on the Physical, Mechanical, Structural and Thermal Properties of Cassava Starch-Based Edible Films*. *International Journal of Biological Macromolecules*, **184**: 574-583. (2021).
- [34] Sharma A.K., Shrivastav P., Chaudhary M., Chauhan R., Banerjee P., *Production OF Biodegradable Plastic Film from Potato and Sago Starch*. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, (2025).
- [35] Hussain U., Siva Sankar S., Lakshman Kumar D., Ramakrishna V., Rajender S., *Pytochemical Fabrication of ZnO Nanoparticles and Their Antibacterial and Anti-Biofilm Activity*. *Scientific Reports*. **14**: 19714 (2024).
- [36] Asma I., Rabbia J., Uzair I., Naceur M., Patrick M., *Unveiling the Power of TiO₂ Doped ZnO Nanomaterial as an Effective Antimicrobial Solution in the Leather Industry*. *Research article*, **10** (2024).
- [37] Akachat B., Himed L., Salah M., 'Elia M.D., Rastrelli L., Barkat M., *Development of Pectin-Based Films with Encapsulated Lemon Essential Oil for Active Food Packaging: Improved Antioxidant Activity and Biodegradation*. *Foods*, (2025).
- [38] Udayagiri H., Sankar Sana S., Kumar Dogiparthi L., Vadde R., Varma R.S., Reddy Koduru J., *Phytochemical Fabrication of ZnO Nanoparticles and Their Antibacterial and Anti-Biofilm Activity*. *Sci Rep*. (2024).

- [39] Kim M., Hillel C., Edwards K., Pietro W., Mermut O., Barrett C.J., [Chitosan-Azo Dye Bioplastics That are Reversibly Resoluble and Recoverable Under Visible Light Irradiation](#), *RSC advances*, (2024).
- [40] Syarifa R., Esmaceli Y., Jafarzadeh S., Garavand F., Mahmud S., Ariffin F., [An Investigation of the Morphological, Thermal, Mechanical, and Barrier Properties of an Active Packaging Containing Micro-and Nano-Sized ZnO Particles](#). *Food Science & Nutrition*, (2023).
- [41] Obeizi Z., Benbouzid H., Ouchenane S., Yılmaz D., [Biosynthesis of Zinc Oxide Nanoparticles from Essential Oil of Eucalyptus Globulus with Antimicrobial and Anti-Biofilm Activitie](#). *Materials Today*, 25 (2020).
- [42] Husain F.M., Qais F.A., Ahmad I., Hakeem M.J., Baig M.H., [Biosynthesized Zinc Oxide Nanoparticles Disrupt Established Biofilms of Pathogenic Bacteria](#). *Applied Sciences*, **12**(2): 710 (2022).
- [43] Udayagiri H., Sana S.S., Dogiparthi LK., Vadde R., Varma R.S., Koduru J.R., Ghodake G.S., [Phytochemical Fabrication of ZnO Nanoparticles and Their Antibacterial and Anti-Biofilm Activity](#). *Scientific Reports*, (2024).
- [44] Kumar P., Gautam S., Bansal D., Kaur R., [Starch-Based Antibacterial Food Packaging with ZnO Nanoparticle](#). *Journal of Food Science and Technology*, (2024).
- [45] [Retracted: Efficacy of Various Types of Berries Extract for the Synthesis of ZnO Nanocomposites and Exploring Their Antimicrobial Potential for Use in Herbal ...](#) *BMR International - BioMed Research International*, (2023).
- [46] Irede E.L., Awoyemi R.F., Owolabi B., Aworinde O.R., Kajola R.O., Hazeez A., Raji A.A., Ganiyu L.O., [Cutting-edge Developments in Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis and Applications for Enhanced Antimicrobial and UV Protection in Healthcare Solutions](#). *RSC advances*, (2024).

شماره چاپ و شماره صفحه در مراجع آورده شود